

doi:10.11707/j.1001-7488.20160710

# 杜仲梦尼夜蛾危害的风险分级\*

孙志强<sup>1,2</sup> 赵 阳<sup>1,2</sup> 马志刚<sup>1,2</sup> 杜红岩<sup>1,2</sup>  
朱景乐<sup>1,2</sup> 王 浩<sup>3</sup> 陈军华<sup>4</sup> 傅建敏<sup>1,2</sup>

(1. 国家林业局泡桐研究开发中心 郑州 450003; 2. 国家林业局杜仲工程技术研究中心 郑州 450003;  
3. 北京市黄韭苗圃 北京 102601; 4. 国家林业局盐碱地研究中心 北京 100091)

**摘 要:** 【目的】对杜仲主要食叶害虫——杜仲梦尼夜蛾危害风险进行分级,为构建杜仲梦尼夜蛾预警技术提供依据,也为其他农林业食叶害虫危害等级划分及预警技术构建提供参考。【方法】借鉴我国民政行业推荐性标准《自然灾害风险分级方法》,以灵宝市的杜仲梦尼夜蛾-杜仲系统为研究对象,通过不同虫口密度导致的叶面积损失率和落果率为主要依据,以预期百叶虫口密度作为种群发生的可能性指标( $P$ ),以预期叶面积损失率范围、落果率范围以及预期发生面积率和管理成本增加率范围为依据,制定相应的风险等级分值( $C$ )。运用归一化原理对量化估算的结果进行赋值,建立杜仲梦尼夜蛾危害的风险( $R$ )分级矩阵。同时,通过对成虫数量进行监测并结合设立标准地进行卵期、幼虫期调查,对种群数量及发生面积的预期大小对其危害等级进行预测,以危害后期实际叶面积损失率和落果率为依据对分级效果的实用性和可操作性进行评估。【结果】不同虫口密度导致的叶面积损失率和落果率差异均达到极显著水平。百叶虫口密度 16 头以上时可造成叶面积损失率 60% 以上,平均每头虫取食造成的叶面积损失率为 2.8%。百叶虫口密度 24 头以上时落果率达到 17% 以上,平均每头虫取食造成的落果率为 0.8%。根据 2015 年 5 月调查的卵块密度、虫口密度和有虫株率等数据,按照发生面积占总面积的权重对各项数据进行加权平均,得到预期百叶虫口密度范围在 11~35 头之间, $P=2$ 。在该虫口密度下的危害风险等级包括:预期发生面积率 75%, $C=2$ ;预期叶面积损失率范围 16%~49%, $C=2$ ;预期落果率范围 6%~10%, $C=3$ ;管理成本增加率为 0, $C=4$ 。根据等级  $C$  取指标分值中的最小者,即  $C=2$ 。对应风险分级矩阵计算风险等级分值  $R=P \times C=2 \times 2=4$ ,属高风险,发布当年第 2 代杜仲梦尼夜蛾发生风险的橙色预警,且不排除个别区域的极高风险。7 月实测的平均叶面积损失率和平均落果率分别为 17.2% 和 9.4%,均在预期损失范围内,其中占总面积 17% 的区域受害极严重,表明这种风险分级是实用的和可操作的。【结论】杜仲梦尼夜蛾危害的风险分值  $R$  可划分为 4 个等级并赋以 4 种颜色,表示杜仲梦尼夜蛾发生风险的 4 个等级:极高风险( $R$  为 1~2),红色;高风险( $R$  为 3~4),橙色;中风险( $R$  为 6~9),黄色;低风险( $R$  为 12~16),绿色。本分级方法适宜于短期预警,即杜仲梦尼夜蛾种群某一个世代的危害预期。下一步研究重点是将各项指标进一步细化,使之能够应用于中长期的预测。

**关键词:** 杜仲; 杜仲梦尼夜蛾; 危害; 风险分级; 预警技术

中图分类号: S763.305 文献标识码: A 文章编号: 1001-7488(2016)07-0078-09

## Risk Grading for Damage of the Defoliator *Orthosia songi* (Lepidoptera: Noctuidae)

Sun Zhiqiang<sup>1,2</sup> Zhao Yang<sup>1,2</sup> Ma Zhigang<sup>1,2</sup> Du Hongyan<sup>1,2</sup>  
Zhu Jingle<sup>1,2</sup> Wang Hao<sup>3</sup> Chen Junhua<sup>4</sup> Fu Jianmin<sup>1,2</sup>

(1. *Paulownia R & D Center of China, State Forestry Administration Zhengzhou 450003;*

2. *Eucommia Engineering Research Center of State Forestry Administration Zhengzhou 450003;*

3. *Beijing Huangfa Nursery Beijing 102601; 4. Saline Alkali Land Research Center of State Forestry Administration Beijing 100091)*

**Abstract:** 【Objective】This study was to establish an early warning technology for forecasting outbreaks of defoliator insects *Orthosia songi* Chen et Zhang based on a recommended standard “Grading Methods of Natural Disaster Risk” issued by Civil Affairs of China. The main aim was to provide relevant information for risk grading and establish a warning technology of outbreak for forest and agriculture defoliator insects. 【Method】This study used *O. songi* - host tree

收稿日期: 2015-09-29; 修回日期: 2016-02-21。

基金项目: 国家林业公益性行业科研专项项目“杜仲主要食叶害虫综合防控技术研究”(201304406)。

\* 傅建敏为通讯作者。澳大利亚联邦科工组织(CSIRO)大气研究所王应平博士修订本文英文摘要并就初稿提出修改意见,在此致谢。

*Eucommia ulmoides* system as a model located at Linbao City, Henan Province, China. Leaf area loss rate (%) and fruit dropped rate (%) were measured under different larval densities (larvae per hundred leaves). Probability index ( $P$ ) of *O. songi* population occurrence was determined using the expected larval densities. Quantitative indexes of loss ( $C$ ) caused by *O. songi* occurrence were used in basis of the expected scope of leaf area loss rate, fruit dropped rate, outbreak area rate and expected increasing management cost rate. A risk classification matrix of *O. songi* occurrence risk was set up based on the normalized risk probability index ( $P$ ) and loss index ( $C$ ). Meanwhile, the expected leaf area loss scope, fruit dropped loss scope and occurrence area was predicted using the observed egg and larval densities in permanent plots in *Eucommia* plantations. These data were used to forecast the risk grade. Feasibility and maneuverability of risk grading system were then evaluated through actual leaf area loss rate and fruit dropped rate during late development stage of the same generation. **【Result】** Leaf area loss rate and fruit dropped rate differed statistically significant among different larval densities. A larval density at 16 larvae per hundred leaves led to more than 60% of leaf area loss. Every single larva caused 2.8% of average leaf loss. The 17% or more of fruits premature drop when larval density was 24 larvae per hundred leaves or above. Every larva caused average 0.8% of fruit premature drop. Based on survey of egg density and larval density in May 2015, we predicted that larval density ranged 11 to 35 larvae per hundred leaves with a probability index  $P$  of 2, and the expected occurrence area rate of 75% at a loss index  $C$  of 2. The expected scope of leaf area loss rate at  $C = 2$  ranged from 16% to 49%, and the expected fruit drop rate at  $C = 3$  varied from 6% to 10%. The expected increase in management cost was 0 with a loss index  $C = 4$ . Therefore the smallest value should be selected as loss index  $C$  when  $C$  had a different value in the risk classification matrix. Risk score  $R$  should be calculated as  $P \times C$ , or  $2 \times 2 = 4$  in the corresponding risk classification matrix. A high risk of orange alert was predicted and did not rule out extremely high risk in some plantations. The actual average leaf area loss rate and fruit dropped rate caused by *O. songi* surveyed in July 2015 were 17.2% and 9.4%, respectively, among which plantations accounted for 17% of the total area suffered extremely high damage. The results fitted well the prediction, indicating that the risk grading method is feasible. **【Conclusion】** Risk score  $R$  of *O. songi* disaster was divided into four grades and was given four different colors for different  $R$  values, or four different levels of risk of *O. songi* occurrence. Red color represent extremely-high risk with  $R$  value ranging 1 - 2; orange color, high risk with  $R$  from 3 - 4; yellow means medium risk with  $R$  from 6 to 9; green represents low risk,  $R$  ranging 12 - 16. The risk grading method in this study was well suited for short-term predictions, i. e. prediction of risk caused by one generation. Refining the indices for long-term prediction will be a focus of future studies.

**Key words:** *Eucommia ulmoides*; *Orthosia songi*; damage; risk grading; warning technology

林业生物灾害包括病、虫、鼠害、有害植物侵入和野生动物感染疫病等,除具有一般生物灾害的共同点外,还具有周期性、受灾面广、危害的间接性和严重性等特点(张国庆, 2008)。其中,森林食叶害虫灾害的特点主要表现在一定区域内周期性的单一虫种或数个虫种的种群暴发。在林业生物灾害预警技术方面,目前尚无被广泛接受的指标体系模式(王桂清等, 2003)。

自然灾害风险分级是对灾害进行识别、评估及管理的依据,也是对灾害开展预警不可或缺的基础(张鹏等, 2014)。2012年4月1日,我国民政行业推荐性标准《自然灾害风险分级方法》正式发布,首次将自然灾害风险分级方法以标准的形式进行规范。该标准提出可操作的自然灾害风险分级方法,即由不利事件的可能性和损失作为风险分级的量化指标,利用风险量化矩阵进行风险分级(教育部减

灾与应急管理研究院, 2012);但并未对具体自然灾害种类以及分级所需的可能性等级指标和后果等级指标进行限定。因此,在借用标准提供的方法上,基于灾害种类以及区域和环境的特点,可以根据实际需要灵活运用。

本文尝试借鉴上述方法以杜仲梦尼夜蛾(*Orthosia songi*)及其寄主杜仲(*Eucommia ulmoides*)为研究对象,开展森林食叶害虫灾害的危害分级方法研究,以期构建杜仲梦尼夜蛾预警技术提供依据,也为其他农林害虫危害等级划分及预警技术构建提供参考。

在开展森林食叶害虫危害等级划分的研究中,建立适当的研究体系是十分必要的。例如,在植食性昆虫-寄主系统研究方面,有学者分别采用食叶害虫-寄主系统和枝干害虫-寄主系统开展过较为深入的研究,如利用扁叶蜂-寄主系统验证联合抗

性假说 (associational resistance) 的研究 (Vehviläinen *et al.*, 2006; 2007)、利用枝干害虫 - 寄主系统开展林分垂直结构和组成结构对小蠹虫的调控机制研究 (Romme *et al.*, 1986)。Romme 等 (1986) 以黑山大小蠹 (*Dendroctonus ponderosae*) - 黑松 (*Pinus contorta* var. *lalifolia*) 为研究体系, 系统研究了影响害虫发生的机制以及害虫发生对森林生态系统的功能作用, 结果表明, 受害后黑松单位面积立木生长量在 10 ~ 15 年内达到或超过危害前水平; 而相关的生态结构、组成以及功能则表现出良性甚至是有益的变化。在揭示食叶害虫发生机制的研究方面, 有学者采用欧洲新松叶蜂 (*Neodiprion sertifer*) - 欧洲赤松 (*Pinus sylvestris*) 系统验证了联合抗性假说 (Kaitaniemi, 2001; Kaitaniemi *et al.*, 2007)。尽管上述研究内容与本研究不同, 但这种研究体系对本研究的开展提供了可借鉴的思路。

选择杜仲梦尼夜蛾 - 杜仲系统开展研究具有 3 方面的原因。其一, 杜仲是我国特有的名贵药材树种, 同时还是世界上除三叶橡胶 (*Hevea brasiliensis*) (天然胶) 之外具有巨大开发前景的优质天然胶源树种 (李芳东等, 2001), 隶属杜仲科 (Eucommiaceae) 杜仲属, 是单科单属单种落叶乔木, 雌雄异株, 是仅在我国有自然分布的孑遗植物。目前大力推广的杜仲果园化栽培模式以收获杜仲叶片、果实和雄花供深加工和杜仲胶提取为经营目标 (Sun *et al.*, 2013; 吴敏等, 2014), 因此, 杜仲的受损害等级易于确立。其二, 杜仲梦尼夜蛾是危害杜仲最主要的寡食性食叶害虫, 只取食杜仲叶片和果实 (周云龙等, 1996; 赵阳等, 2015), 近年来在贵州、湖南、湖北、陕西、河南等杜仲主产区大量发生, 给杜仲产业的健康发展造成了重大威胁 (孙志强等, 2011), 因此, 开展本项研究具有重要的现实意义。其三, 这种生态系统相对较为简单、封闭, 影响杜仲梦尼夜蛾种群的生物因素 (如杜仲纯林林分特征) 和非生物因素 (如立地条件) 易于甄别, 有利于开展其种群动态的监测。

本文所涉及的“不利事件的可能性”设定为杜仲梦尼夜蛾种群发生的可能数量, 所涉及的“损失”由因其取食导致的杜仲叶面积损失、果实脱落以及预期增加的管理成本来确立。在以往开展的杜仲梦尼夜蛾在林间的空间分布、生活史及幼虫取食量研究 (赵阳等, 2014; 2015) 的基础上, 本文针对“损失”指标通过人为控制虫口密度的方法, 系统测定不同虫口密度危害引发的叶面积损失率和落果率; 并基于上述结果, 结合目前市场对杜仲叶片、果实等

实际需求, 制定相应风险造成的“损失”量化指标, 对杜仲梦尼夜蛾危害风险进行分级。同时, 通过对成虫数量进行监测并结合在杜仲林间设立标准地进行卵期、幼虫期调查, 根据种群数量发生的大小对其危害等级进行预测, 通过危害后期对叶面积损失率和落果率的调查对分级效果的实用性和可操作性进行评估。

## 1 研究方法

### 1.1 成虫年活动节律监测

2013 年在河南省灵宝市朱阳镇闫驮乡 (110°39'37"E, 34°16'18"N) 杜仲种植基地场部楼顶 (海拔 1 035 m) 安装佳多牌振频式 (JDA-III) 自动虫情测报灯, 2013 和 2014 年均从 3 月 15 日开始, 每天统计 1 次捕获的杜仲梦尼夜蛾成虫数量, 直至连续 7 天未捕获成虫截止。

### 1.2 不同虫口密度的危害特征试验

2014 年 6 月底, 在闫驮乡种植基地, 采用标准枝套袋接虫的方式测定不同虫口密度对叶片和果实产量的影响。前期研究发现, 杜仲梦尼夜蛾幼虫期共 8 龄, 其中 6 ~ 8 龄 3 个龄期幼虫的取食量占幼虫期取食总量的 80% (赵阳等, 2015), 因此为保证参试幼虫一致性和便于操作, 本研究统一采用经室内饲养获得的 4 龄幼虫开展试验。百叶虫口密度设置为 2, 4, 8, 16, 24, 32 头及 CK (空白对照) 共 7 个处理, 每处理重复 5 次。具体方法如下: 每处理选取 1 根约 30 cm 长的标准枝, 清除枝上所有昆虫并统计枝上的叶片和果实数量。将对应数量的 4 龄幼虫放入管体由底部至管口被黑色塑料薄膜覆盖 2/3 的 100 mL 圆底塑料离心管中, 离心管管口朝上并用胶带固定到待接标准枝上, 利用幼虫的趋光性, 让幼虫自主爬出离心管。待所有幼虫扩散到枝上之后, 迅速套上长 80 cm、直径 32 cm 的 40 目纱窗网套, 封口。2014 年 10 月初统计每处理的叶面积损失率和果实剩余量并计算落果率。

### 1.3 危害分级划分

借鉴《自然灾害风险分级方法》并参考文献 (张鹏等, 2014), 以  $R$  代表杜仲梦尼夜蛾危害风险:

$$R = P \times C. \quad (1)$$

式中:  $P$  为杜仲梦尼夜蛾种群发生的可能性分级 (以百叶虫口密度范围为指标);  $C$  为杜仲梦尼夜蛾取食产生的损失分级, 包括预期叶面积损失率范围、落果率范围、实际发生面积比率和预期管理成本增加率范围等指标。

根据  $P$  和  $C$  的分值, 建立杜仲梦尼夜蛾危害分

级矩阵。

#### 1.4 应用与评估

为了避免人为干扰因素对虫口密度的影响,选择河南省灵宝市朱阳镇庄科乡杜仲基地开展调查。庄科乡基地(34°22′15.1″E, 110°37′23.4″N)位于闫驮乡西约25 km处,于1994年开始造林,总面积为800 hm<sup>2</sup>,以收获杜仲叶片和树皮为经营目标,几乎无人为干扰。2013年3月,在庄科乡基地布设10块标准样地,每块样地面积30 m × 30 m,样地保护带宽度20 m。

2015年5月25—28日和7月28—30日,于杜仲梦尼夜蛾的第2代始发期和第3代发生盛期分别调查百叶虫口密度、百叶卵块数、叶面积损失率,其中7月的调查指标中加上落果调查,用于评估杜仲梦尼夜蛾危害等级划分的可行性。具体方法为:每块样地随机选取5个样株,每株按照东、南、西、北4个方向,按上、中、下分3层各随机选取1根1年生枝条作为样枝,每样枝剪取30~40 cm枝段,分别统计样枝上的杜仲梦尼夜蛾幼虫数量、卵块数量及叶片数量,通过估测每片叶被取食的面积,经累计后计算该样枝上的叶面积平均损失率;若样株为雌株,则统计果实数量、果实被取食数量和脱落数量(果实脱落者在枝条着果柄处可见褐色斑痕)。

#### 1.5 数据统计与分析

利用SPSS 20.0软件对数据进行统计分析,结果以平均值 ± 标准差表示,单因素方差分析(ANOVA)和Duncan's多重比较分析不同虫口密度对叶面积损失率、落果率的影响。

以5月调查的各项数据为依据,根据前期关于幼虫取食量和平均每个卵块包含虫卵数量预测各个样地叶面积损失率和落果率,以每块样地所代表的相同立地条件和林分条件的面积代表发生面积,按照发生面积占总面积的比例为权重,预测整体危害等级;然后以7月的实测数据评估预测的准确性。

## 2 结果与分析

### 2.1 成虫年活动节律

2013和2014年杜仲梦尼夜蛾成虫数量监测结果如图1所示。2013年成虫始见于4月2日,分别在4月中旬、7月上旬和7月下旬出现了羽化高峰。2014年成虫始见于4月3日,与2013年相比,同样出现了3个羽化高峰,但分别在4月中旬、7月中旬和8月中旬。在不同羽化高峰之间不间断地有成虫出现,说明杜仲梦尼夜蛾种群存在明显的世代重叠现象。

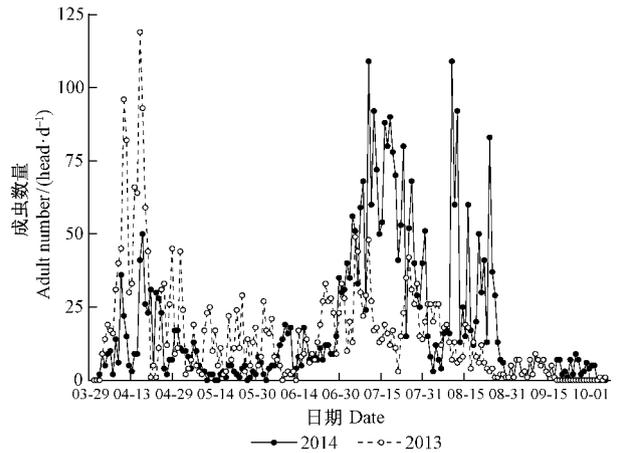


图1 2013和2014年杜仲梦尼夜蛾成虫数量监测

Fig. 1 *O. songi* adult population monitoring in Yantuo base in 2013 and in 2014

### 2.2 不同虫口密度的危害特征

杜仲梦尼夜蛾幼虫取食叶片或者果实后,叶片呈缺刻状,并会致使被取食果实黑变、提早脱落。不同虫口密度处理间的叶面积损失率( $F = 18.715$ ,  $P = 0.000$ )和落果率( $F = 7.950$ ,  $P = 0.000$ )差异均达到极显著水平。其中,百叶虫口密度16, 24, 32头3个处理之间的叶面积损失率差异不显著,均在60%以上,显著高于百叶虫口密度2, 4, 8头以及空白对照4个处理的叶面积损失率,平均每头虫取食造成的叶面积损失率为2.8%,与室内饲养结果相符(赵阳等, 2015);百叶虫口密度24, 32头2个处理之间的落果率差异不显著,均达到17%以上,显著高于百叶虫口密度2, 4, 8, 16头以及空白对照5个处理的落果率,平均每头虫取食造成的落果率为0.8%(表1)。

### 2.3 危害等级

目前市场上的杜仲叶为3.5~4.5元·kg<sup>-1</sup>,杜仲果实为50~75元·kg<sup>-1</sup>。杜仲叶一般要求叶面缺失少于20%,因此,当叶面积损失率>20%时会大大降低等级,同时叶面积损失的增加也会相应地增加收获过程中的人力成本。理论上,当百叶虫口密度>35头时,按照单虫导致的平均叶面积损失率计算(表1),叶面积损失率会超过90%,导致叶片绝收;同理,当落果率>15%,即减产15%会使得当年的管理成本相应增加。以上条件可用于指导杜仲梦尼夜蛾危害等级之划分。杜仲梦尼夜蛾种群以百叶虫口密度范围为指标从高到低可分为4个等级,分别用等级P的分值表示(表2)。杜仲梦尼夜蛾取食产生的后果指标从高到低可分为4个等级,分别用等级C的分值表示(表3)。

表 1 不同虫口密度取食叶面积损失率和落果率<sup>①</sup>

Tab. 1 Leaf area loss rate and fruit drop rate among different larval densities

百叶虫口密度 Larval density larvae per hundred leaves	叶面积损失率 Leaf area loss rate (%)	单虫导致的平均叶 面积损失率 Mean leaf loss rate caused by per larvae (%)	落果率 Fruit dropped rate (%)	单虫导致的平均落果率 Mean fruit dropped rate caused by per larvae (%)
2	4.4 ± 3.5 b	2.2	3.3 ± 2.3 b	1.6
4	9.1 ± 3.5 b	2.3	2.9 ± 1.4 b	0.7
8	22.8 ± 10.9 b	2.8	4.6 ± 2.3 b	0.6
16	62.8 ± 27.3 a	3.9	5.7 ± 2.0 b	0.4
24	72.0 ± 26.5 a	3.0	17.0 ± 11.9 a	0.7
32	76.6 ± 23.1 a	2.4	19.2 ± 7.1 a	0.6
0	0 c	0	1.9 ± 3.0 b	—

① 同列中字母相同者表示差异不显著。Column with the same letter mean significant difference.

表 2 杜仲梦尼夜蛾发生可能性等级分值<sup>①</sup>Tab. 2 Index value classification of the possibility of *O. songi* damage

可能性等级分值 <i>P</i> Possibility grade score <i>P</i>	杜仲梦尼夜蛾风险可能性 Risk possibility of <i>O. songi</i>	备注 <sup>①</sup> Note
1	极高 Extremely-high	百叶虫口密度 > 35 头, 造成极高损失 > 35 larvae per hundred leaves which could cause extremely-high damage
2	高 High	百叶虫口密度 11 ~ 35 头, 造成高等级损失 11 ~ 35 larvae per hundred leaves which could cause high damage
3	中 Medium	百叶虫口密度 3 ~ 10 头, 损失等级中等 3 ~ 10 larvae per hundred leaves which could cause medium damage
4	低 Low	百叶虫口密度 < 2 头, 对杜仲整体影响小, 几乎不造成任何损失 < 2 larvae per hundred leaves which could cause no damage

① 风险用当年杜仲梦尼夜蛾种群某一代幼虫的百叶虫口密度表示 Risk possibility of *O. songi* was represented by some one generation larval density, i. e. larvae per hundred leaves.

表 3 杜仲梦尼夜蛾危害后果导致损失等级分值<sup>①</sup>Tab. 3 Index value classification of seed loss caused by *O. songi* damage

损失等级 分值 <i>C</i> Loss grade score <i>C</i>	后果等级 Consequences grade	后果指标 Index of consequences			
		叶面积损失率 Leaf area loss rate (%)	落果率 Fruit dropped rate (%)	发生面积占总面积比率 Ratio of occurrence area to total area (%)	增加管理成本比率 Ratio of increased cost (%)
1	极高 Extremely-high	> 50	> 30	> 80	> 50
2	高 High	16 ~ 49	11 ~ 29	41 ~ 79	11 ~ 49
3	中 Medium	6 ~ 15	6 ~ 10	21 ~ 40	< 10
4	低 Low	< 5	< 5	< 20	0

① 当一次杜仲梦尼夜蛾危害后果的 4 个指标是不同的分值时, 其等级 *C* 的分值取该 4 个后果指标分值中的最小者。表中数值按四舍五入取整。Whenever the four values of loss grade score were different from one another, only the smallest score should be used. Other numerical values inside the table should be rounded to integer. 叶面积损失率指因害虫取食直接导致的叶面积损失。Leaf area loss rate refers to leaf area loss directly eaten by larvae. 落果率指因害虫取食直接导致的果实损失。Fruit dropped rate refers to fruit dropped prematurely caused by larval feeding. 发生面积比率指实际发生面积占总面积的比率 Occurrence area rate refers to ratio of occurrence area to total area. 管理成本指与常规管理相比, 在害虫大发生时增加的管理成本, 包括害虫防治增加的人力物力成本等。Management cost refers to the increment of management cost under the circumstances of pest population outbreak including pest control cost and extra labor and material cost, compared to routine management cost without pest outbreak.

根据自然灾害风险分级矩阵及杜仲梦尼夜蛾发生可能性等级分值 *P* 和杜仲梦尼夜蛾危害后果导

致损失等级 *C* 的分值, 建立杜仲梦尼夜蛾危害风险分级矩阵, 如表 4 所示。

表4 杜仲梦尼夜蛾危害风险分级矩阵<sup>①</sup>Tab. 4 Risk classification matrix of *O. songi* damage

可能性等级 分值 <i>P</i> Possibility grade score <i>P</i>	后果等级分值 <i>C</i> Consequence grade score <i>C</i>				
	极高 Extremely-high	高 High	中 Medium	低 Low	
	1	2	3	4	
极高 Extremely-high	1	1	2	3	4
高 High	2	2	4	6	8
中 Medium	3	3	6	9	12
低 Low	4	4	8	12	16

①  $R = P \times C$ 。  $R$  划分为 4 个等级, 表示杜仲梦尼夜蛾发生风险的 4 个等级: 极高风险,  $R$  为 1~2; 高风险,  $R$  为 3~4; 中风险,  $R$  为 6~9; 低风险,  $R$  为 12~16。 Risk grade score  $R$  was divided into four grades or four different levels of risk consequence of *O. songi* occurrence. Extremely-high risk with  $R$  value from 1 to 2; High risk, 3-4; Medium risk 6-9; Low risk, 12-16.

## 2.4 应用与评估

根据 5 月调查的卵块密度、虫口密度和有虫株率以及发生面积等数据, 对后期发生及其危害预期进行计算, 结果见表 5。前期调查发现, 杜仲梦尼夜蛾产卵于叶部背面, 所产卵堆积在一起形成卵块, 每卵块包含 70~230 个卵不等, 平均 105 个。本文在进行预期虫口密度计算时, 按每块 100 个卵计算; 同时, 前期室内饲养发现, 幼虫期存活率达 98% (赵阳等, 2015), 林间的自然存活率超过 70% (赵阳, 2015)。按照发生面积占总面积的权重对各项数据进行加权平均, 得到预期百叶虫口密度范围在 11~35 头之间,  $P=2$  (表 5)。在该虫口密度下的危害风险等级包括预期发生面积占总面积的 76%,  $C=2$ ; 预期叶面积损失率范围 21%~49%,  $C=2$ ; 预期落果率范围 6%~10%,  $C=3$  (表 5)。在庄科乡基地, 几乎没有人为干扰, 因此, 管理成本增加率为 0,  $C=4$ 。当一次杜仲梦尼夜蛾危害后果的 4 个指标为不同的分值时, 其  $C$  的分值取该 4 个后果指标分值中的最小者, 即  $C=2$ , 对应的风险分级矩阵中风险等级分值  $R = P \times C = 2 \times 2 = 4$ , 属高风险, 因此, 发布当年第 2 代杜仲梦尼夜蛾发生风险的橙色预警, 且不排除个别区域的极高风险。

7 月调查结果如表 6 所示。整体上, 10 块样地的实际平均叶面积损失率为 17.2%, 在预期的 16%~49% 范围内。叶面积损失率除了 7 号样地低于预期范围, 其余样地的叶面积损失率均在预期范围内, 其中 9 号样地叶面积损失率平均达 64.1%,

而 9 号样地代表的面积权重占总面积的 17%。由于 4 号、8 号和 10 号样地内的样株均为雄株, 剩余 7 块有雌株的样地平均落果率达 9.4%, 在预期的 6%~10% 范围内。5 号样地落果率小于预测范围, 其他样地的落果率虽然较低, 但均在预期范围内, 其中 9 号样地落果率达 23.4%。对照以上结果, 依据 5 月的调查数据对 7 月预期损失的分析预测符合实际发生情况, 即发生风险等级属高风险, 个别区域造成的危害等级极高, 表明这种风险分级是实用和可操作的。

## 3 讨论

在农业和林业害虫预测和防治研究与实践中, Stern 等 (1959) 提出的经济阈值 (economic threshold) 概念是现代害虫防治的基本决策依据, 也是当今经济昆虫学和害虫防治中讨论最多的问题 (盛承发, 1989; 盛承发等, 2003)。Stern 等 (1959) 将经济阈值定义为害虫的某一密度, 对此密度应采取防治措施, 以防治害虫达到经济危害水平 (economic injury level), 即引起经济损失的最低虫口密度。盛承发 (1989) 结合棉铃虫 (*Helicoverpa armigera*) 经济阈值的研究工作, 提出经济阈值的新定义: “害虫的某一密度, 达到此密度时应采取控制措施, 否则, 害虫将引起等于这一措施期望代价的期望损失。”

经济阈值研究涉及的一个关键问题就是害虫种群动态的预测。昆虫种群动态的最显著特点之一是其种群周期性的暴发, 又被称之为“种群循环” (population cycles), 昆虫种群的动态循环更具有普遍性 (Bjørnstad *et al.*, 2001)。对于引发这种种群循环的明确的机制是学者们争论的焦点, 普遍而且较为一致的观点认为, 营养水平的相互作用和遗传效果导致的滞后负反馈机制是造成这种循环的主要原因 (Berryman, 1996; Hunter *et al.*, 1997; Hanski *et al.*, 2001)。多数来自低营养水平 (如寄主植物) 和/或高营养水平 (如捕食者、病害等) 的负反馈若存在时间迟滞效应, 则这种负反馈能够造成周期性的种群波动 (Haukioja, 1991; Berryman, 1996)。生态系统相互影响及相互作用的复杂性使得测量或预测生态系统过程显得困难重重 (Walther *et al.*, 2002; Ims *et al.*, 2005), 尤其是预测昆虫种群的暴发 (Volney *et al.*, 2000; Bale *et al.*, 2002)。当昆虫种群发生数量的预期与实际发生情况出现偏差时, 那么, 依据经济阈值所做出的决策本身就是低效甚至是无效的。另一方面, 正如盛承发等 (2003) 所认为的, 经济阈值预测的较大误差源自计算问题, 譬如来自虫量统计、

表 5 以卵块密度、虫口密度和发生面积为依据的预期风险可能性分级值  $P$  及损失分级值  $C$   
**Tab. 5 Possibility grade score ( $P$ ) and consequence index value ( $C$ ) based on densities of eggs, larva and expected occurrence area**

样地 Plot	卵块 Egg		虫口 Larval		实际发生面 积权重/总面 积权重 Actual occurrence area weight/ Total area weight	预期百叶虫 口密度范围 Expected scope of larval density per hundred leaves	预期叶面积 损失率范围 Expected scope of leaf area loss rate (%)	预期落果率 范围 Expected scope of fruit dropped rate (%)
	每百叶卵块数 Egg per hundred leaves	有卵株率 Ratio of trees with eggs (%)	百叶虫口密度 Larvae per hundred leaves	有虫株率 Ratio of trees with larva (%)				
1	0.4	60	10	100	5/7	11 ~ 35	6 ~ 15	6 ~ 10
2	0.7	40	8	40	2/5	11 ~ 35	6 ~ 15	6 ~ 10
3	0.2	20	7	40	6/8	3 ~ 10	6 ~ 15	6 ~ 10
4	0.3	60	17	80	7/9	11 ~ 35	16 ~ 49	6 ~ 10
5	0.4	40	17	60	6/7	11 ~ 35	6 ~ 15	6 ~ 10
6	0.3	60	10	60	10/12	11 ~ 35	6 ~ 15	6 ~ 10
7	0.9	60	23	80	9/13	> 35	16 ~ 49	11 ~ 29
8	0.2	40	12	100	7/8	3 ~ 10	6 ~ 15	6 ~ 10
9	1.6	100	34	100	15/17	> 35	> 50	11 ~ 29
10	0.2	60	30	80	9/14	3 ~ 10	16 ~ 49	6 ~ 10
按样地面积权重 平均 Mean value according to plot area weight	0.25	60	21	80	76/100	11 ~ 35	16 ~ 49	6 ~ 10
可能性等级分级 $P$ Possibility grade score $P$	2							
后果等级分值 $C$ Consequence grade score $C$	2					2		3

表 6 杜仲梦尼夜蛾危害的预期损失与实际损失的比较

**Tab. 6 Comparison of the expected and actual leaf and seed loss caused by *O. songi* damage**

样地 Plot	预期百叶 虫口密度 Expected scope larvae per hundred leaves	预期叶面积 损失率范围 Expected scope of leaf area loss rate (%)	实际平均叶 面积损失率 Actual mean leaf area loss rate (%)	预期落果率范围 Expected scope of fruit dropped rate (%)	实际落果率 Actual fruit dropped rate (%)
1	11 ~ 35	6 ~ 15	11.5	6 ~ 10	6
2	11 ~ 35	6 ~ 15	6.3	6 ~ 10	7
3	3 ~ 10	6 ~ 15	6.7	6 ~ 10	6.8
4	11 ~ 35	16 ~ 49	19.8	6 ~ 10	0
5	11 ~ 35	6 ~ 15	7.1	6 ~ 10	5
6	11 ~ 35	6 ~ 15	13.4	6 ~ 10	6
7	> 35	16 ~ 49	10.8	11 ~ 29	11.3
8	3 ~ 10	6 ~ 15	11	6 ~ 10	0
9	> 35	> 50	64.1	11 ~ 29	23.4
10	3 ~ 10	16 ~ 49	20.9	6 ~ 10	0
实测后果与预期比较 Comparison between actual loss consequences and expected one	11 ~ 35	16 ~ 49	17.2	6 ~ 10	9.4

理论产量和防治效果等方面的计算错误。从本质上说,经济阈值是一个多维、动态、随机的经济生态学参数,其理论值可能无法知道,实际制定时只能逼近,且不同的制定方法甚至立地的差异会造成不同

程度的误差(盛承发等, 2003)。例如,有学者总结到,同是意大利蝗(*Calliptamus italicus*),在新疆 2 个不同地区由蒿(*Artemisia* spp.) + 苔草(*Carex liparocarpos*) + 羊茅(*Festuca valesiaca*)等构成的相

同草地植被类型中,其防治经济阈值相差达 8.6 倍(刘艳等,2011)。因此,在后来长期的研究应用中,尽管研究手段有所提高、分析方法不断改进,但限定范围狭窄的绝对量值化的经济阈值研究和应用仍然不时出现问题。

反观在自然灾害预警方面,都是通过对灾害风险和灾害损失进行分级,然后对风险分级(如危险度与易损度)与损失分级进行估算(如人口损失、经济财产损失及生态系统损失),运用归一化的原理进行赋值,这样就可以量化估算的结果。这种灾害风险等级和损失度等级的划分并不能表现出风险损失的绝对量,是一种风险损失的相对等级划分,可以在灾害风险损失评估过程中增强可操作性(陈报章等,2010)。

森林害虫暴发频率高、危害程度深、经济损失大,其重要原因正如前所述,是对森林害虫灾害发生的预警能力差(王桂清等,2003)。有学者指出,森林害虫灾害预警指标的确立应遵循可测性原则、可靠性原则、准确性原则、代表性原则、匹配性原则,并特别指出作为一种灾害指标体系,入选指标必须减少到最小限额,因此要选择那些在显示灾害方面具有较强代表性的指标(王国华等,2005)。周玉江等(2012)率先尝试了林业有害生物预警等级的研究,选取有害生物连片发生面积、可能造成的林木直接经济损失等关键指标来确定等级,并将其划分为 4 级:特大等级(I 级,红色预警信号)、重大等级(II 级,橙色预警信号)、较大等级(III 级,黄色预警信号)、一般等级(IV 级,蓝色预警信号),但这种分级方法与《自然灾害风险分级方法》仍有较大出入。

与其他用材树种不同的是,当前杜仲产业的原材料主要取自杜仲叶、果实和雄花等器官,因此,年度产量是最具代表性的指标,这样就大大简化了主要指标的筛选。因此,在制定危害风险等级时,重点考虑的是以上杜仲器官受危害的可能损失,暂时不用将杜仲受危害后的材积损失包含在指标内。同时,发生面积和抚育管理成本是另外需要考虑的主要因素。目前国内的杜仲种植多数较为集中连片,集约化程度高,因此杜仲梦尼夜蛾-杜仲生态系统自成体系,杜仲梦尼夜蛾取食习性使之单向依赖于杜仲,这些条件为杜仲梦尼夜蛾危害风险的分级研究提供了便利。

## 4 结论

借鉴《自然灾害风险分级方法》,本文重点依据森林害虫灾害预警的可测性原则和代表性原则,对

杜仲梦尼夜蛾危害的风险进行分级划分并建立了风险分级矩阵。风险等级分值  $R$  划分为 4 个等级:极高风险, $R$  为 1~2(可用红色表示);高风险, $R$  为 3~4(可用橙色表示);中风险, $R$  分值为 6~9(可用黄色表示);低风险, $R$  分值为 12~16(可用绿色表示)。在实际运用上,本分级方法适宜于短期预警,即害虫种群某一个世代的危害预期,并可根据标准地所代表区域的预期危害等级划分出重点防控区域。从应用结果看,由 2015 年 5 月根据实测数据推演的预期发生面积、预期叶面积损失率范围、预期落果率范围的等级范围绝大部分都符合 7 月的实测结果,表明这种风险分级是实用和可操作的。作为首次尝试,本研究在指标选取、实际操作和运用方面必然存在缺陷,如何进一步完善将是下一步重点开展的研究内容,譬如,根据数据建立模型,由模型推导出所划分等级的确切虫口密度;同时,将各项指标进一步细化,使之能够适应中长期的预测。

## 参 考 文 献

- 陈报章, 仲崇庆. 2010. 自然灾害风险损失等级评估的初步研究. 灾害学, 25 (3): 1-5.
- (Chen B Z, Zhong C Q. 2010. A Preliminary study on risk loss degree assessment of natural hazards. Journal of Catastrophology, 25 (3): 1-5. [in Chinese])
- 教育部减灾与应急管理研究院. 2012. 自然灾害风险分级方法. 北京: 中国标准出版社.
- Research Institute of Disaster Reduction and Emergency Management of Ministry of Education. 2012. Grading methods of natural disaster risk. Beijing: China Standard Press.
- 李芳东, 杜红岩, 2001. 杜仲. 北京: 中国中医药出版社.
- (Li F D, Du H Y. 2001. *Eucommia ulmoides* Oliv. Beijing: Chinese Medicine Press. [in Chinese])
- 刘 艳, 张泽华, 王广军. 2011. 草地蝗虫防治的经济阈值与生态阈值研究进展. 草业科学, 28 (2): 308-312.
- (Liu Y, Zhang Z H, Wang G J. Research progress on economic and ecological threshold of grassland locust control. Pratacultural Science, 28 (2): 308-312. [in Chinese])
- 盛承发. 1989. 害虫经济阈值的研究进展. 昆虫学报, 32 (4): 492-500.
- (Sheng C F. 1989. An overview on the conception of economic threshold. Acta Entomologica Sinica, 32 (4): 492-500. [in Chinese])
- 盛承发, 宣维健. 2003. 正确理解和应用经济阈值. 昆虫知识, 40 (1): 63-65.
- (Sheng C F, Xuan W J. 2003. Perspective on understanding and using of economic threshold in pest control. Entomological Knowledge, 40 (1): 63-65. [in Chinese])
- 孙志强, 李芳东, 杜红岩, 2011. 杜仲集约化栽培潜在的病虫害及其应对策略. 经济林研究, 29 (4): 70-76.
- (Sun Z Q, Li F D, Du H Y. 2011. Potential diseases and insect pests disasters and control strategy of intensive cultivation in *Eucommia*

- ulmoides. *Nonwood Foresy Research*, 29 (4): 70 – 76. [in Chinese]
- 王桂清, 周长虹. 2003. 森林害虫灾害预警指标体系研究. *林业科技*, 28 (5): 21 – 24.
- (Wui G Q, Zhou C H. 2003. Studies on the early-warning index system to calamity of forest pest. *Forestry Science & Technology*, 28 (5): 21 – 24. [in Chinese])
- 王国华, 刘延利, 齐国涛. 2005. 森林害虫灾害预警指标研究. *防护林科技*, (5): 55 – 56.
- (Wang G H, Liu Y L, Qi G T. 2005. Studies on the early-warning index to calamity of forest pest. *Protection Forest Science and Technology*, (5): 55 – 56. [in Chinese])
- 吴敏, 赵阳, 马志刚, 等. 2014. 果园化栽培模式杜仲雄花、果实和叶片产量的调查分析. *林业科学研究*, 27 (2): 270 – 276.
- (Wu M, Zhao Y, Ma Z G, *et al.* 2014. Investigation of male flower, fruit and leaf yield from an *Eucommia ulmoides* orchard system. *Forest Research*, 27 (2): 270 – 276. [in Chinese])
- 张国庆. 2008. 我国林业生物灾害管理体系研究. [2012 – 11 – 07]. <http://www.seiencenet.cn/blouser.content.aspx>.
- (Zhang G Q. 2008. Research on China's forestry biological disaster management system. [2012 – 11 – 07]. <http://www.seiencenet.cn/blouser.content.aspx>. [in Chinese])
- 张鹏, 李宁. 2014. 我国自然灾害风险分级方法的标准化. *灾害学*, 29 (2): 60 – 64.
- (Zhang P, Li N. 2014. The standardization of natural disasters risk grading methods in china. *Journal of Catastrophology*, 29 (2): 60 – 64. [in Chinese])
- 赵阳, 朱景乐, 李芳东, 等. 2014. 杜仲梦尼夜蛾幼虫的空间分布型及抽样技术. *环境昆虫学报*, 36 (4): 629 – 634.
- (Zhao Y, Zhu J L, Li F D, *et al.* 2014. Larval spatial distribution pattern and sampling technique of *Orthosia songi* Chen et Zhang. *Journal of Environmental Entomology*, 36 (4): 629 – 634. [in Chinese])
- 赵阳, 朱景乐, 李芳东, 等. 2015. 杜仲梦尼夜蛾发育历期及取食行为研究. *植物保护*, 41 (2): 75 – 79.
- (Zhao Y, Zhu J L, Li F D, *et al.* 2015. Developmental duration and feeding behavie of *Orthosia songi*. *Plant Protection*, 41 (2): 75 – 79. [in Chinese])
- 赵阳. 2015. 杜仲梦尼夜蛾的发生规律及防治技术研究. 中国林业科学研究院硕士学位论文.
- (Zhao Y. 2015. Population dynamic and control technique of *Orthosia songi* Chen et Zhang. MS thesis of Chinese Academy of Forestry. [in Chinese])
- 周云龙, 张声堂, 刘湘银, 等. 1996. 杜仲梦尼夜蛾生物学特性及防治研究. *西北林学院学报*, 11 (2): 64 – 68.
- (Zhou Y L, Zhang S T, Liu X Y, *et al.* 1996. Advances and prospects of the comprehensive exploitation of *Eucommia ulmoides*. *Journal of Northwest Forestry College*, 11 (2): 64 – 68. [in Chinese])
- 周玉江, 张旭东, 柴守权, 等. 2012. 林业有害生物预警等级指标. *东北林业大学学报*, 40 (2): 103 – 105.
- (Zhou Y J, Zhang X D, Chai S Q, *et al.* 2012. Hierarchical index for early warning of forest pests. *Journal of Northeast Forestry University*, 40 (2): 103 – 105. [in Chinese])
- Bale J S, Masters G J, Hodkinson I D, *et al.* 2002. Herbivory in global climate change research: direct effects of rising temperature on insect herbivores. *Global Change Biology*, 8 (1): 1 – 16.
- Berryman A A. 1996. What causes population cycles of forest Lepidoptera? *Trends in Ecology & Evolution*, 11 (1): 28 – 32.
- Bjørnstad O N, Grenfell B T. 2001. Noisy clockwork: time series analysis of population fluctuations in animals. *Science*, 293 (5538): 638 – 643.
- Hanski I, Henttonen H, Korpimäki E, *et al.* 2001. Small-rodent dynamics and predation. *Ecology*, 82 (6): 1505 – 1520.
- Haukioja E. 1991. Induction of defenses in trees. *Annual Review of Entomology*, 36: 25 – 42.
- Hunter M D, Varley G C, Gradwell G R. 1997. Estimating the relative roles of top-down and bottom-up forces on insect herbivore populations: a classic study revisited. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 94 (17): 9176 – 9181.
- Ims R A, Fuglei E. 2005. Trophic interaction cycles in tundra ecosystems and the impact of climate change. *Bioscience*, 55 (4): 311 – 322.
- Kaitaniemi P. 2001. Sources of variability in plant resistance against insects: free caterpillars show strongest effects. *Oikos*, 95 (3): 461 – 470.
- Kaitaniemi P, Riihim K J, Koricheva J, *et al.* 2007. Experimental evidence for associational resistance against the European pine sawfly in mixed tree stands. *Silva Fennica*, 41 (2): 259 – 268.
- Romme W H, Knight D H, Yavitt J B. 1986. Mountain pine beetle outbreaks in the Rocky Mountains: regulators of primary productivity? *American Naturalist*, 127 (4): 484 – 494.
- Stern M V, Smith F R, Bosch R V D, *et al.* 1959. The integration of chemical and biological control of the spotted alfalfa aphid: the integrated control concep. *Hilgardia*, 29 (2): 81 – 101.
- Sun Z Q, Li F D, Du H Y, *et al.* 2013. A novel silvicultural model for increasing biopolymer production from *Eucommia ulmoides* Oliver trees. *Industrial Crops & Products*, 42: 216 – 222.
- Vehviläinen H, Koricheva J, Ruohom K K. 2007. Tree species diversity influences herbivore abundance and damage: meta-analysis of long-term forest experiments. *Oecologia*, 152 (2): 287 – 298.
- Vehviläinen H, Koricheva J, Ruohomäki K, *et al.* 2006. Effects of tree stand species composition on insect herbivory of silver birch in boreal forests. *Basic and Applied Ecology*, 7 (1/2): 1 – 11.
- Volney W J A, Fleming R A. 2000. Climate change and impacts of boreal forest insects. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 82 (1/3): 283 – 294.
- Walther G R, Post E, Convey P, *et al.* 2002. Ecological responses to recent climate change. *Nature*, 416: 389 – 395.

(责任编辑 朱乾坤)